

파라메트릭 변압기의 동작해석에 관한 연구

(A Study on the Analysis of Parametric Transformer)

정 기 화* · 박 한 응** · 우 정 인***

(Kee-Hwa Jung · Han-Woong Park · Jung-In Woo)

요 약

파라메트릭 발진을 이용한 전력변환장치로서, 파라메트릭 변압기의 동작원리를 설명한다. 이 기기의 수학적인 모델을 유도하여 기기의 출력측에 발진이 발생하는 영역을 구하고, 이 영역내에서의 각 특성을 시뮬레이션에 의해 살펴봄으로서 정성적 및 정량적 해석을 시도하였다. 그밖에도 기기가 주파수 변환기나 여파기로서 동작함도 보여준다.

Abstract

A parametric transformer, as static power converter operating on the principle of parametric excitation, is analysed. For the purpose of quantitative analysis of device, the mathematical model of the device is derived. On the basis of this model, the performances of the parametric transformer, such as over and under voltage protection, overload protection, bilateral filtering and frequency multiplication, are obtained quantitatively and analysed qualitatively.

1. 서 론

파라메트릭 변압기(Parametric Transformer, 이하 PT)는 자기회로의 포화로 인한 인덕턴스의 변화에 의해 에너지를 전달하는 전력변환장치로서, 본질적으로는 parametric oscillator를 구성하기 위해 기기출력단에 커패시터를 연결한 가변인덕턴

스 장치이다. 인덕턴스가 평균값에서 회로의 공진주파수의 2배주파수로 변화하면 출력측에 parametric resonance가 발생하여 발진이 확립되며, 이때 입력에너지는 인덕턴스를 변화시켜 주는 성분과 출력 및 손실성분으로 이루어진다. 따라서 자속의 상호쇄교에 의해 동작하는 보통의 변압기와는 그 동작원리가 다르다.

*正會員：海軍士官學校 電氣工學科 副教授

**正會員：海軍士官學校 電氣工學科 專任講師

***正會員：東亞大學校 工大 電氣工學科 教授·工博

接受日字：1992年 9月 24日

이러한 PT의 기본원리는 오래전부터 알려져 왔으며^{1)~4)} 그 특성상 구조가 간단하여 쉽게 고장이 발생하지 않으며 과부하 및 과전압보호특성이나 잡음의 여파특성 및 입력전압에 대해 출력전압이 移相되는 특성 등을 가지고 있기 때문에 각 방면에 응용이 연구되고 있으며, 특히 파라메트릭 전동기와 DC-AC 연계용 전력변환장치로써 기대를 모으고 있다.^{5)~8)}

본 논문은 PT의 동작을 이해하기 쉽게 분석하고, 기기의 자화특성곡선상의 비선형영역에서 자속의 상호작용에 의해 발생하는 parametric coupling으로부터 수학적인 모델을 유도한다. 이로부터 기기의 제 특성을 구하여 모델링의 타당성을 입증함과 동시에, 각 응용분야에서의 해석에 적용시킬 수 있는 기초를 확립하고자 한다.

2. PT의 구조와 원리

그림 1은 PT의 기본구성을 나타내고 있다. PT는 그림과 같이 성층한 2개의 C형 자심을 공간적으로 90° 회전시켜 접합한 것으로써, 각 자심에는 N_1 및 N_2 의 권선이 감겨져 있다. N_1 권선에는 여자용전원 E_1 을 연결하고 N_2 권선에는 C를 연결한다. 실험에 사용된 파라메트릭 변압기의 자심

표 1. 실험에 사용된 자심치수 및 회로정수

Table 1. Core size and circuit constant of experimental unit

자심치수	$D_0=25(\text{mm}), D_1=50(\text{mm}), D_2=75(\text{mm}), D_3=75(\text{mm})$
회로정수	$N_1=200(\text{회}), N_2=200(\text{회}), R_1=3(\Omega), R_2=3(\Omega)$

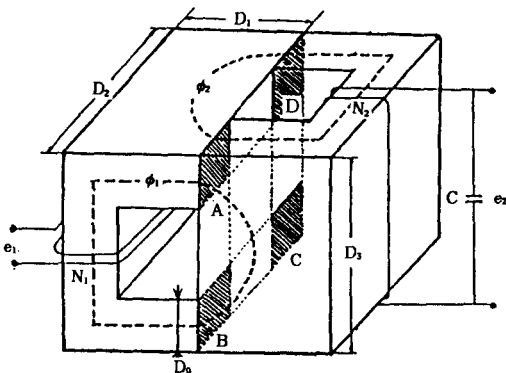


그림 1. 파라메트릭 변압기의 구조
Fig. 1. The structure of parametric transformer

치수 및 회로정수가 표1에 주어져 있다. 여기서 R_1 과 R_2 는 각각 1차권선 및 2차권선의 저항을 나타낸다.

자심의 4개의 접합면 A, B, C, D는 다른 부분의 자로에 비해 단면적이 좁으므로 포화가 크게 발생하여 인덕턴스를 변화시키는 역할을 하게 된다. 이때 자심구조가 대칭이므로 E_1 및 E_2 에 의해 발생하는 자속 ϕ_1 과 ϕ_2 는 서로 다른쪽 권선과 쇄교하지 않으므로 1차 및 2차 회로사이의 상호인덕턴스는 존재하지 않는다. 그러나 일부 자기회로는 두 자심에 공통이므로 각 자속은 인덕턴스를 변화시킬 수 있다. 예를 들면 1차전류 I_1 이 증가하면 ϕ_1 은 접합면을 포화시켜 2차회로의 인덕턴스를 감소시킨다. 또 그 역도 성립한다. 이때 인덕턴스의 변화는 전원주파수의 2배로 변화하게 된다.

1차전압 E_1 을 변화시켰을 때의 인덕턴스의 변화파형을 나타낸 것이 그림 2이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 E_1 을 증가시키면 ϕ_1 이 증가하여 자심의 포화정도가 커지게 되고 따라서 인덕턴스의 변화폭도 깊어지게 된다. 그림의 A부분은 자심의 자화특성곡선을 다항식으로 근사화시킴으로써 나타나는 것으로 실제 A부분의 인덕턴스변화파형은 최대값인 점선으로 나타난다. 그러나 이 부분은 발진을 발생시킬 만큼 그 진폭변화가 크지 않기때문에 전체특성에는 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 인덕턴스는 전원주파수의 2배주파수로 변화하되 여자전압의 크기에 따라 진폭변화가 결정되며, 그 진폭의 크기가 어떤값 이상으

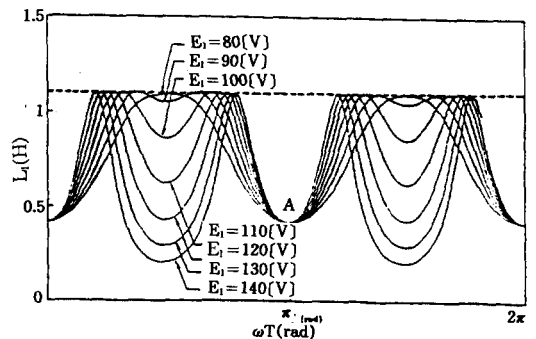


그림 2. 입력전압에 따른 인덕턴스의 변화 파형
Fig. 2. Waveforms of inductance variation for various input vltage

로 되면 발진축의 콘덴서와 parametric resonance 를 이루어 발진이 개시된다.

3. 회로 방정식

일반적인 변압기이론을 기초로 하여 PT의 등가회로를 그림 3과 같이 나타내었다. 그림의 점선부분은 이상적인 파라메트릭 결합을 나타내고 있다. 1차 및 2차 전류가 각 자속에 미치는 영향을 고려하면 다음식이 성립한다.

$$N_1 i_1 = F_1(\phi_1, \phi_2) \quad (1)$$

$$N_2 i_2 = F_2(\phi_1, \phi_2) \quad (2)$$

여기서 N_1 과 N_2 는 1차 및 2차권선수, i_1 과 i_2 는 1차 및 2차전류, F_1 과 F_2 는 1차 및 2차기자력, ϕ_1 과 ϕ_2 는 1차 및 2차자속을 나타낸다. 해석을 간편히 하기 위해 회로의 철손과 누설리액턴스를 무시하면, 그림 3의 2차회로에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$i_2 = i_c + i_L = \frac{F_2(\phi_1, \phi_2)}{N_2} \quad (3)$$

$$R_L i_L = \frac{1}{C} \int i_c dt = -N_2 \frac{d\phi_2}{dt} - R_2 i_2 \quad (4)$$

이때 i_c 와 i_L 은 2차측의 콘덴서 및 부하저항에 흐르는 전류, R_L 은 부하저항, C 는 동조용콘덴서, R_2 는 2차권선의 저항을 나타낸다. 식(3)에서 i_c 와 i_L 을 소거하면 다음식이 성립한다.

$$\frac{d^2 \phi_2}{dz^2} + B \frac{d\phi_2}{dz} + C \frac{d}{dz} \{F_2(\phi_1, \phi_2)\} + G \cdot F_2(\phi_1, \phi_2) = 0 \quad (5)$$

여기서

$$B = \frac{1}{\omega \cdot R_L \cdot C}$$

$$C = \frac{R_2}{\omega \cdot N_2^2}$$

$$G = \frac{1}{\omega^2 \cdot N_2^2 \cdot C} \left(1 + \frac{R_2}{R_L}\right)$$

$$z = \omega t$$

이며, ω 는 전원의 각주파수이다. 또 1차회로의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\phi_1}{dz} + A \cdot F_1(\phi_1, \phi_2) = \frac{e_1}{\omega \cdot N_1} \quad (6)$$

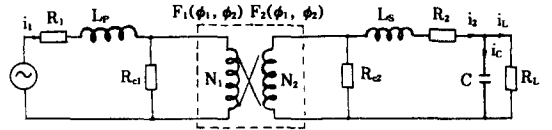


그림 3. 파라메트릭 변압기의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit for parametric transformer

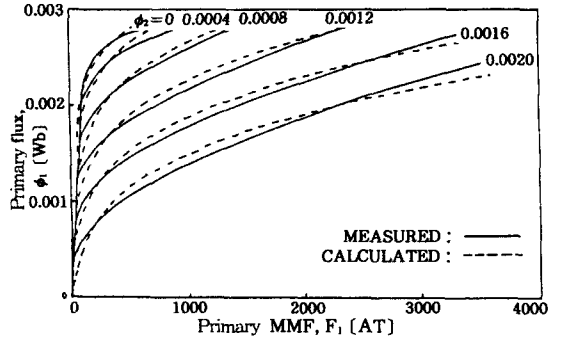


그림 4. 자화특성 곡선
Fig. 4. Magnetization curves

$$\text{여기서 } A = \frac{R_1}{\omega \cdot N_1^2}$$

이며, $e_1 = E_{lm} \cos(z)$ 로써 여자전압을 나타내고 E_{lm} 은 그 최대치이다.

PT의 자화특성곡선이 그림 4에 나타나 있다. 그림에서 실선은 실측치이고 점선은 실측치를 근사화시켜 계산한 파형으로써, 두 곡선사이의 약간의 오차는 존재하지만 기기특성에는 크게 영향을 미치지 않는다.

자화특성곡선의 근사식은 다음과 같이 된다.

$$U = k_1 \cdot \phi + k_3 \cdot \phi^3 + k_5 \cdot \phi^5 \quad (7)$$

여기서 U 는 기자력을 나타낸다. 또한 그림 1로부터 자기회로의 등가회로를 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

그림으로 부터

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_a + \phi_b & \phi_2 &= \phi_a - \phi_b \\ \phi_b &= \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} & \phi_a &= \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

이며, 또한 1, 2차권선의 기자력은

$$\begin{aligned} F_1 &= U_a + U_d \\ F_2 &= U_c - U_d \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다. 여기서 $\phi_a \cdot \phi_b$ 및 $U_a \cdot U_b \cdot U_c \cdot U_d$ 는 각 자로의 자속 및 기자력을 나타낸다. 식(8)을 식

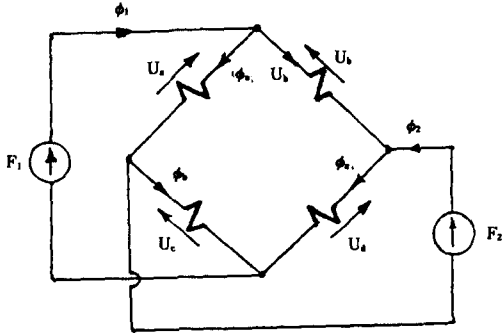


그림 5. 자기회로 등가회로
Fig. 5. Magnetic equivalent circuit

(9)에 대입하여 ϕ_1 과 ϕ_2 의 함수로써 F_1 및 F_2 를 구하여 이것을 식 (5)와 (6)에 대입하면 다음식을 얻는다.

$$\frac{d^2\phi_2}{dz^2} + f_3(\phi_1, \phi_2) \frac{d\phi_2}{dz} + f_4(\phi_1, \phi_2) \phi_2 + f_5(\phi_1, \phi_2) \phi_2^3 + P_2 \phi_2^5 = 0 \quad (10)$$

$$\frac{d\phi_1}{dz} + f_1(\phi_1, \phi_2) \phi_1 + f_2(\phi_1, \phi_2) \phi_1^3 + P_1 \phi_1^5 = \frac{e_1}{\omega N_1} \quad (11)$$

여기서

$$f_1(\phi_1, \phi_2) = A(k_1 + \frac{3}{4}k_3\phi_2^2 + \frac{5}{16}k_5\phi_2^4)$$

$$f_2(\phi_1, \phi_2) = A(-\frac{k_3}{4} + \frac{5}{8}k_5\phi_2^2)$$

$$f_3(\phi_1, \phi_2) = B + C\{(k_1 + \frac{3}{4}k_3\phi_1^2 + \frac{5}{16}k_5\phi_1^4) + 3(\frac{1}{4}k_3 + \frac{5}{8}k_5\phi_1^2)\phi_2^2 + \frac{5}{16}k_5\phi_2^4\}$$

$$f_4(\phi_1, \phi_2) = C(\frac{3}{2}k_3\phi_1 + \frac{5}{4}k_5\phi_1^3) \frac{d\phi_1}{dz} + G(k_1 + \frac{3}{4}k_3\phi_1^2 + \frac{5}{16}k_5\phi_1^4)$$

$$f_5(\phi_1, \phi_2) = \frac{5}{4}k_5C\phi_1 \frac{d\phi_1}{dz} + G(\frac{k_3}{4} + \frac{5}{8}k_5\phi_1^2)$$

$$P_1 = \frac{1}{16}Ak_5$$

$$P_2 = \frac{1}{16}Gk_5$$

이다. 식(10) 및 (11)은 일반해가 존재하지 않는 시변계수를 갖는 비선형미분방정식이다. 일반적으로 파라메트릭 발진이 발생하는 기구를 나타내는 Mathieu-Hill방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2X}{dz^2} + (a - 2q \cdot \cos 2z) \cdot X = 0 \quad (12)$$

여기서 a, q: 상수

이다. 위식에서 X의 계수항이 기본주파수의 2배로 변화하면 불안정영역에서 파라메트릭발진이 발생한다. 이것을 식 (10)과 비교하면 ϕ_2 항은 역시 인덕턴스가 ϕ_1 과 ϕ_2 에 의해 변화하는 것을 나타낸다. 또 추가된 항인 $\frac{d\phi_2}{dz}$ 항의 시변계수 $f_4(\phi_1, \phi_2)$ 를 조사하면, R_1 과 R_2 및 자기포화에 의해 발생한 손실에 해당함을 알 수 있고, ϕ_2^3 및 ϕ_2^5 항의 계수 $f_5(\phi_1, \phi_2)$ 및 P_2 는 자기회로의 포화에 해당하는 항으로 2차측 출력전압의 발산을 억제하는 역할을 함을 알 수 있다.

4. 특성 해석

이상의 시험기 조건 및 수학적인 모델을 기초로 시뮬레이션에 의해 기기의 여러가지 특성을 구했다. 이때 기기의 누설리액턴스와 철손은 무시했다.

4.1 발진특성

입력전압에 대한 출력전압의 변화에 대한 이론적 특성이 그림 6에 나타나 있다. 그림 6의 화살

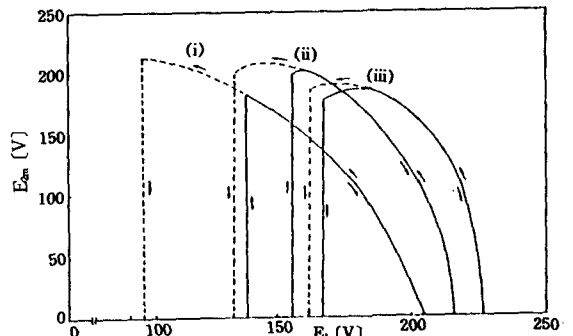


그림 6. 입력전압에 대한 출력전압의 특성
Fig. 6. Output voltage to input voltage characteristics
(i) $C=100(\mu F)$ (ii) $C=150(\mu F)$ (iii) $C=200(\mu F)$

표는 입력전압을 0[V]→250[V]→0[V]로 변화시켰을 때 동작점이 움직이는 방향을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 입력전압 E_1 의 증가에 따라 1차자속밀도가 커져서 충분히 포화되전까지는 2차에 발진이 발생하지 않으며, 어느 크기의 전압에서 발진전압 E_2 가 확립되고 E_1 을 계속 증가시키면 E_2 가 점점 줄어들고 결국 0[V]가 된다. 이것은 1차 및 2차자속 사이에는 다음과 같은 관계가 있기 때문이다.

$$\phi_{1m} + M_1\phi_{2m} = M_2 \quad (13)$$

여기서 ϕ_{1m} 및 ϕ_{2m} 은 1차 및 2차자속의 최대값이고, M_1 및 M_2 는 상수이다. 또 E_1 을 서서히 감소시켜 가면 최초로 발진이 확립된 전압 이하에서도 계속 E_2 가 유지되는데, 이는 식(10)의 $f_4(\phi_1, \phi_2)$ 의 향으로 인한 reaction으로 인해 1차측에서 reactive power를 흡수하기 때문이다. 따라서 히스테리시스 효과가 존재한다. 그러므로 기기는 과전압 및 저전압 보호특성을 가지는 것을 알 수 있다.

4.2 移相특성

그림 7은 무부하시, $E_1=170[V]$, $C=150[\mu F]$ 일 때의 E_1 과 E_2 의 위상을 나타내고 있다. 그림에서는 E_1 에 대해 E_2 가 $\frac{\pi}{2}$ 만큼 뒤진 위상에서 고정되어 발진하고 있지만, 초기조건에 따라서는 $\frac{\pi}{2}$ 만큼 앞선 파형이 되기도 한다. 이것은 발진 조건과 에너지전달량으로부터 결정되는 값이다. 즉, 무부하시 PT의 입력전압에 대한 출력전압의 移相角은 거의 $\pm \frac{\pi}{2}$ 가 된다.

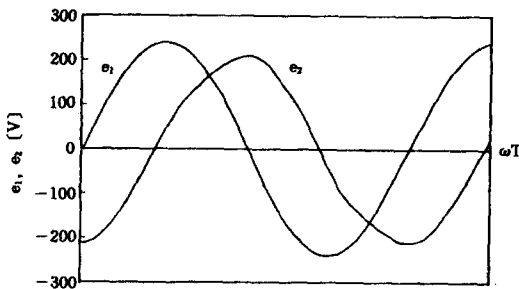


그림 7. e_1 에 대한 e_2 의 위상 특성
Fig. 7. Phase relation between e_1 and e_2

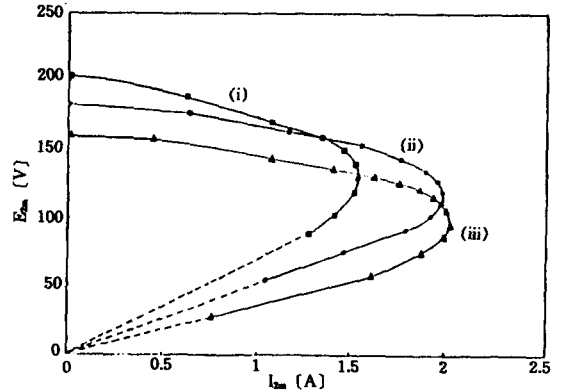


그림 8. 저항부하특성
Fig. 8. Resistive load characteristic
(○) $E_1=160[V]$ (●) $E_1=170[V]$ (■) $E_1=180[V]$

4.3 부하 특성

PT가 저항부하를 담당하는 경우의 부하특성은 그림 8에 나타낸다. 부하저항이 감소함에 따라 부하전압은 감소하며 결국 부하전압과 전류는 모두 0으로 된다. 이것은 기기가 전달할 수 있는 전력량은 입력전압의 크기에 의해 일정하므로 부하전류의 증가에 따라 부하전압은 감소하게 되고, 어떤 크기 이상의 부하전류를 필요로 하게 되면 안정발전조건을 벗어나므로 동작이 중지하게 된다. 또 그림 6에서 알 수 있듯이 같은 입력전압에 대해 C의 값이 클 수록 출력전압의 크기는 감소하나 최대부하전류는 증가하여 전달전력은 일정하게 유지된다. 따라서 과부하보호특성을 가진다.

그림 9는 부하의 크기에 따른 입력전압 E_1 에 대한 출력전압 E_2 의 위상변화를 나타낸 것이다. 무부하일 때 E_2 는 E_1 에 거의 $\pm \frac{\pi}{2}$ [rad]의 위상으로 고정되어 있지만, 부하저항이 감소할수록 移相角이 $\pm \frac{\pi}{2}$ 보다 더 커짐을 알 수 있다. 이것은 전술한 것처럼 부하조건에 따라 발진조건이 변하기 때문이다. 따라서 $\pm \frac{\pi}{2}$ 로부터의 移相角의 변화량이 부하의 크기를 나타낸다.

4.4 전류파형

전류파형은 PT의 자화특성곡선으로부터 ϕ_1, ϕ_2

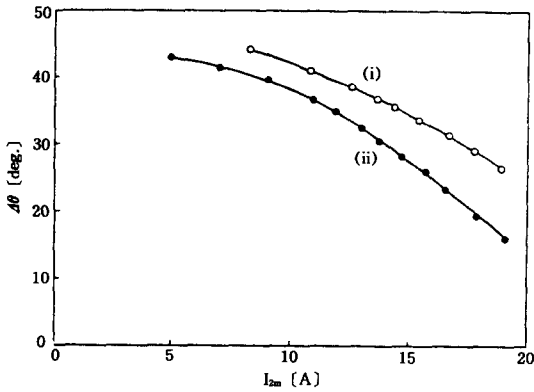


그림 9. 부하에 따른 移相 특성
 Fig. 9. Phase-shift characteristic with load variation
 (i) $E_1=180$ (V), $C=200$ (μ F) (ii) $E_1=170$ (V),
 $C=150$ (μ F)

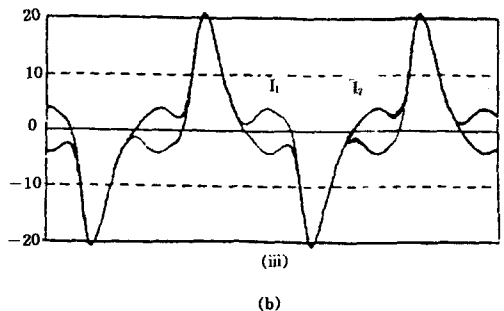
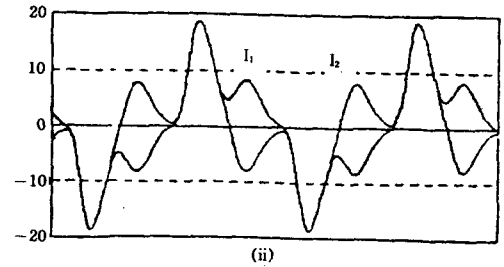
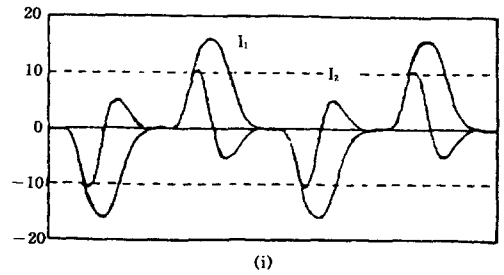
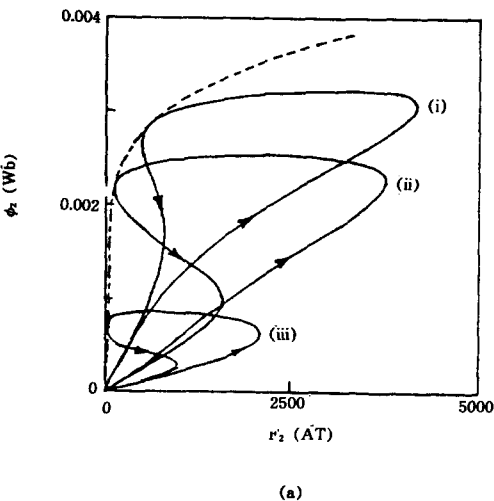
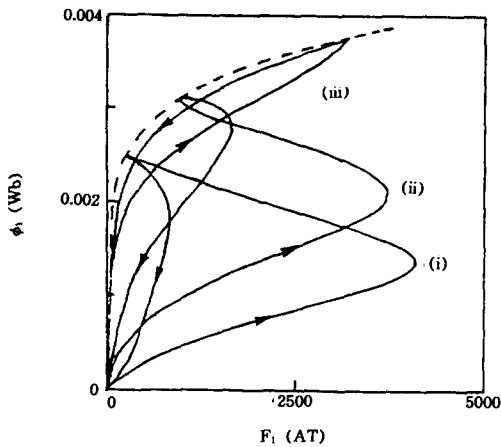


그림 10. 부하에 따른 상대자화곡선과 전류파형과의 관계
 (a) 상대자화곡선 (b) 전류파형
 Fig. 10. Relationship between relative magnetization curves
 and current waveforms according to load variation
 (a) RMC (b) Current waveforms
 (i) $R_L=1$ (K Ω) (ii) $R_L=70$ (Ω) (iii) $R_L=40$ (Ω)

의 크기에 따라 얻어지는 상대자화곡선⁴⁾과 밀접한 관계가 있다. 즉 상대자화곡선이 선형이 되면 전류는 거의 정현파에 가깝고, convex한 형태가 되면 고조파가 많이 함유된 왜곡된 파형이 되는 것은 이미 보고된 바 있다.⁴⁾ 그림 10은 이러한 전류와 상대자화곡선간의 관계를 나타내고 있다. 실험은 $E_1 = 170$ (V), $C = 150$ (μ F)에서 부하에 따른 형태변화를 나타내었다. 또, 그림 11은 입력 전압 E_1 의 변화에 따른 형태변화를 나타내고 있다.

이상으로부터 상대자화곡선의 상승과 하강시 그 형태가 선형에 가까울수록 전류파형은 정현파에 가깝고 convex하면 왜곡됨을 알 수 있다. 이

때 상대자화곡선의 상승부의 convex한 정도는 전류의 첫번째 첨두치의 크기를 결정하고 하강부는 두번째 첨두치의 크기를 결정한다.

4.5 효율 및 역률 특성

그림 12는 출력에 대한 효율 및 역률 특성을 나타내고 있다. 기기의 철손 및 누설리액턴스를 무시하고 시뮬레이션 했음에도 불구하고 효율 특성은 아주 나쁘다. 이는 기기의 설계가 최적으로 이루어지지 않음으로 해서 포화효과 및 인덕턴스 변화를 위한 에너지소모가 큰 것이 그 첫번째 이유가 되고, 또 권선저항도 큰 값을 사용하였기 때문에 열손실 또한 커서 전체적으로 효율이 크게 저하한 것으로 생각되나, 이것 또한 권선단면적과 관계가 있으므로 효율개선은 기기의 최적설계문제로 귀착된다 하겠다.

PT의 회로는 대부분 리액턴스성분으로 이루어져 있으며, 2차측의 부하가 저항성인 경우에도 전력을 공급하는 방법이 자기회로의 인덕턴스를 변화시켜 이루어지는 것이므로 역률은 아주 나쁘게 된다.

4.6 주파수 변환 특성

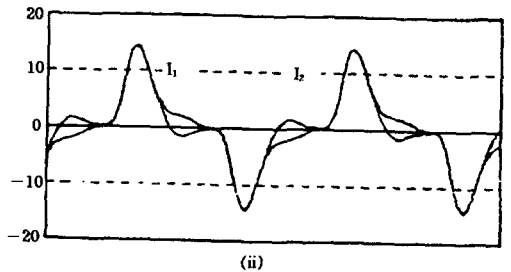
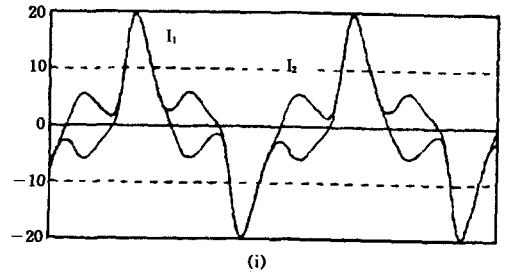
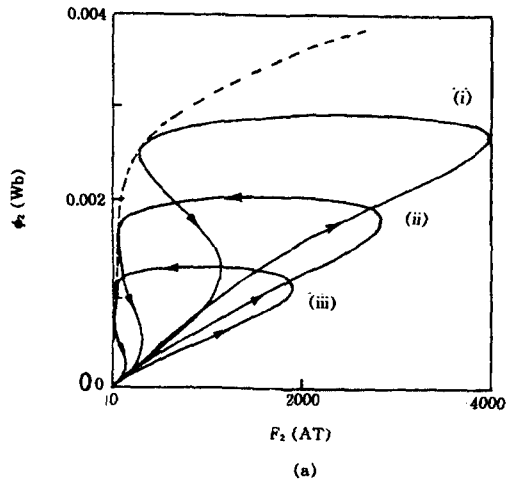
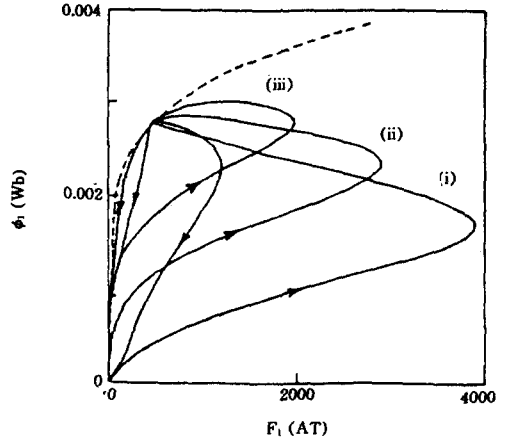
정상상태 동작시 공진컨덴서가 아래와 같은 값에서 어느 범위이내로 유지되면 PT의 출력전압은 입력전압과 동일한 주파수로 발진이 이루어진다.

$$C = \frac{1}{\omega^2 N_2^2} \left[k_1 + \frac{3}{4} k_3 (A^2 + B^2) + \frac{5}{8} k_5 (A^2 + B^2) \right] \quad (14)$$

$$A = \frac{E_{1m}}{\omega N_1}, \quad B = \frac{E_{2m}}{\omega N_2}$$

그러나 이 값이 $\frac{1}{4}C$ 로 되면 Mathieu-Hill 방정식의 두번째 불안정영역에서 발진이 확립된다. 이때 발진주파수는 전원주파수의 2배 주파수로 되어 주파수 증배기(frequency doubler)로 동작한다. 그림 13은 이 동작을 나타내고 있다.

또 C의 값을 크게 증가시키면 출력전압은 전원주파수의 반으로 되어 주파수분할기(frequency



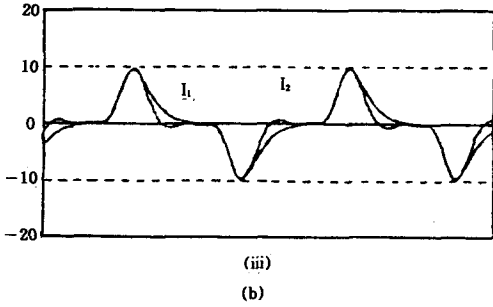


그림 11. 입력전압에 따른 상대자화곡선과 전류파형과의 관계

Fig. 11. Relationship between relative magnetization curves and current waveforms according to input voltage variation
(a) RMC (b) Current waveforms
(i) $E_1=158(V)$ (ii) $E_1=183(V)$ (iii) $E_1=208(V)$

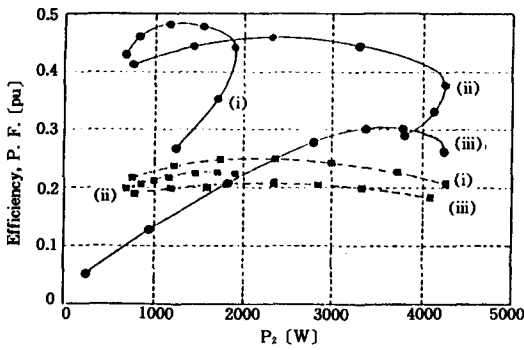


그림 12. 효율 및 역률 특성
Fig. 12. Efficiency and power factor characteristic
(i) $C=100(\mu F)$ (ii) $C=150(\mu F)$ (iii) $C=200(\mu F)$

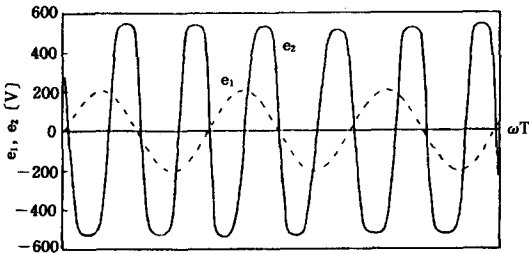


그림 13. 주파수증배기 동작
Fig. 13. Operation in frequency doubler

divider)로써 동작한다. 이것이 그림 14에 있다.

그러나 시뮬레이션에 의하면 이러한 주파수 변환기로써의 동작은 그 영역이 좁고 불안정하며 전압조정작용(voltage regulation) 또한 좋지 않다.

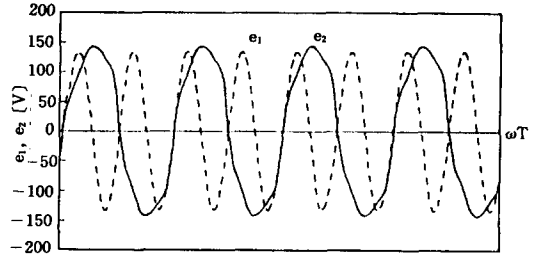


그림 14. 주파수분할기 동작
Fig. 14. Operation in frequency divider

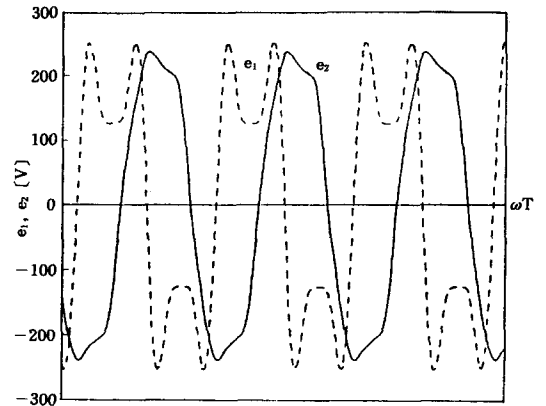


그림 15. 여파기 동작
Fig. 15. Operation in filter

4.7 여파 특성

PT가 인덕턴스의 변화로 인해 출력측에 발진이 확립되는 기구를 가지고 있으므로, 입력전압의 고조파성분은 인덕턴스의 변화과정에는 나타나나 콘덴서와의 공진시 고조파성분은 제거된다. 따라서 PT는 훌륭한 여파기(filter)로써 동작함을 알 수 있다. 이것을 그림 15에 나타내고 있다.

따라서 이 특성을 이용하여 간단한 구동회로를 갖는 파라메트릭 전동기나 DC-AC 연계용 전력 변환장치로의 응용이 활발하며 그 특성 또한 만족스러운 것으로 보고된 것도 있다.^{5)~8)}

5. 결론

파라메트릭 발진을 이용한 파라메트릭 변압기의 기본원리를 제시하고 측정된 자화특성곡선을 수식으로 근사화시켜 이것으로부터 기기가 가지

는 고유한 특성인 과전압 및 저전압 보호특성, 과부하보호특성, 주파수변환특성, 여파특성 등을 구하여 정성적 및 정량적 해석을 행했다. 그러나 출력이나 효율 및 역률 특성에서 볼 수 있듯이 기기의 성능향상을 위한 최적설계문제는 당면한 연구과제로서 현재 진행중에 있다. 그럼에도 불구하고 파라메트릭 변압기는 고유의 우수한 특성 때문에 파라메트릭전동기나 태양에너지의 전력 변환장치 등의 응용에 큰 기대를 모으고 있다.

参 考 文 献

- 1) K. BURLIAN, "Theory and analysis of a parametrically-excited passive power converter", *IEEE Trans. IA-8*, pp. 278~282, 1972.
- 2) P. K. SEN and W. Z. FAM, "Analysis of the parametric converter", *IEEE Trans. IECI-26*, pp. 93~98, 1979.
- 3) E. S. TEZ and I. R. SMITH, "Mathematical model and characteristics of parametric transformers", *IEE Proc. B*, Vol. 129, No. 3, pp. 117~129, 1982.
- 4) E. S. TEZ and I. R. SMITH, "Energy transfer mechanism and current waveforms of parametric transformers", *IEE Proc. B*, Vol. 130, No. 3, 1983.
- 5) K. Murakami, S. Kikuchi & T. Watanabe, "Characteristics of a new AC motor making good use of parametric oscillation", *IEEE Trans. MAG-16*, Sep., 1980.
- 6) K. Murakami, S. Kikuchi, T. Watanabe & H. Miyazaki, "Characteristics of two new parametric motors for high speed rotation and disk rotation", *IEEE Trans. MAG-18*, p. 1743, Nov. 1982.
- 7) S. Kikuchi, Y. Sakamoto, O. Ichinokura & K. Murakami, "An interesting method for obtaining parametric motor with excellent performance", *IEEE Trans. on Magnetics, MAG-18*, p. 1746, Nov., 1982.
- 8) O. Ichinokura & K. Murakami, "Analysis of orthogonal-core type transformer for DC-AC interconnection system", *IEEE, Trans. MAG-21*, p. 1750, 1985.